

Dr hab. inż. Zbigniew Świder, prof. PRz  
Katedra Informatyki i Automatyki  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 27.04.2023

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne  
wpłynęło dnia ..... 9.05.2023  
nr ..... 19 ..... zał. ....

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Tytuł rozprawy:* Application of fusion of chosen control performance assessment methods for automatic diagnostics and performance improvement of control systems  
*Autor rozprawy:* mgr inż. Patryk Grelewicz  
*Promotor rozprawy:* prof. dr hab. inż. Jacek Czczot  
*Promotor pomocniczy:* dr hab. inż. Tomasz Kłopot, prof. Pol. Śl.  
*Dziedzina:* nauki inżyniersko-techniczne  
*Dyscyplina:* automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej.

### 1. Cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Grelewicza dotyczy syntezy systemu do oceny jakości zamkniętych układów regulacji PID opartego na wykorzystaniu metod uczenia maszynowego. Proponowane rozwiązanie polega na ocenie jakości regulacji na podstawie znormalizowanej odpowiedzi układu na celowo wprowadzone zakłócenie skokowe i porównaniu jej z przyjętym przebiegiem referencyjnym. Zastosowano tu algorytmy uczenia maszynowego, gdzie zbiory uczące i walidacyjny składają się z wektora trzydziestu wskaźników oceny jakości regulacji wraz z oceną binarną (OK lub NOK) jako etykieta. Opracowano również automatyczną metodę etykietowania opartą na wskaźnikach częstotliwościowych (zapasy amplitudy i fazy) uzupełnionych o znormalizowaną odległość od przebiegu referencyjnego. Działanie proponowanego systemu porównano z innymi metodami oraz zweryfikowane na podstawie przeprowadzonych symulacji i badań eksperymentalnych (z wykorzystaniem infrastruktury chmurowej).

W rozprawie postawiono następującą tezę:

*Opracowany system może jednoznacznie ocenić jakość regulacji na podstawie odpowiedzi na zakłócenie skokowe dla zamkniętych układów regulacji PID w automatyce przemysłowej, przy jednoczesnym jasnym i obiektywnym uwzględnieniu predefiniowanych założeń i ograniczeń.*

Ogólna koncepcja proponowanego systemu CPA polegała na ocenie skuteczności regulacji PID w oparciu o reakcję systemu na celowo wprowadzone zakłócenie skokowe. Dane uzyskane z odpowiedzi w pętli zamkniętej wykorzystano do obliczania różnych indeksów o niskiej złożoności obliczeniowej. Osobno takie indeksy opisują tylko pewne właściwości wydajności rozważanych systemów, więc proponowany system CPA bierze jednocześnie pod uwagę kilka wybranych cech odpowiedzi w pętli zamkniętej, a obliczone dla nich indeksy dostarczają użytecznych informacji do ogólnej oceny skuteczności układu regulacji.

Jednym z kluczowych założeń proponowanego systemu CPA była możliwość zastosowanie go do jak najszerszej klasy procesów przemysłowych. Jako model procesu został wybrany SOPDT, ponieważ zapewnia on stosunkowo wysoką dokładność modelowania, również w obecności dynamiki wyższego rzędu, a dodatkowo jego parametry można łatwo zidentyfikować na podstawie odpowiedzi skokowej w pętli otwartej lub zamkniętej. Do walidacji eksperymentalnej opracowano opartą na chmurze implementację proponowanego systemu CPA z wykorzystaniem przemysłowego sterownika PLC (Siemens S7-1500).

## **2. Struktura i zawartość rozprawy**

Recenzowana praca doktorska obejmuje formalnie 2 główne rozdziały (synteza systemu CPA oraz jego implementacja w sterowniku PLC), poprzedzone wstępem oraz zakończone podsumowaniem. Zasadnicza część rozprawy liczy łącznie 97 stron, a ponadto zawiera spis bibliografii liczący 125 pozycji oraz pięć dodatków.

Praca rozpoczyna się wstępem, w którym przedstawiono motywację i tezę postawioną w rozprawie. Autor podkreśla w nim kluczowe znaczenie stałego monitorowania wydajności regulacji oraz jego wpływ na systemy przemysłowe, jak np. efektywność energetyczną, jakość produktu i zużycie materiałów. Zdaniem Autora system CPA powinien być jak najbardziej ogólny, a więc móc ocenić wydajność regulacji dla jak najszerszego zakresu procesów występujących w przemysłowych systemach zautomatyzowanych. Dodatkowo ocena jakości regulacji powinna być jednoznaczna i binarna, gdzie OK wskazuje na dobrą wydajność, a NOK na słabe wyniki regulacji.

W rozdziale 2 opisano kolejne etapy syntezy proponowanego systemu CPA, a w szczególności przypomniano zasady modelowania procesów dynamicznych i normalizację modelu, dokonano wyboru cech odpowiedzi w pętli zamkniętej, opisano korelację pomiędzy CPI a indeksami stochastycznymi, podano sposób generowania odpowiedzi referencyjnych w pętli zamkniętej oraz zbiorów danych szkoleniowych i walidacyjnych. W dalszej części dokonano wyboru algorytmu klasyfikacji, przedstawiono wyniki symulowanej walidacji systemu za pomocą procesów SOPDT oraz procesów wyższego rzędu.

W rozdziale 3 przedstawiono implementację proponowanego systemu CPA z wykorzystaniem przemysłowego sterownika PLC, dokonano analizy korelacji wybranych CPI oraz przeprowadzono redukcję wektora cech. Podano szczegóły techniczne implementacji w sterowniku PLC oraz wyniki weryfikacji eksperymentalnej i wnioski.

W podsumowaniu przypomniano cel i zakres pracy, a także postawioną tezę. Przedstawiono założenia oraz wymagania stawiane proponowanemu systemowi CPA. Podkreślono jego główną zasadę, a więc porównanie rzeczywistej wydajności regulacji z predefiniowaną wydajnością referencyjną, uzyskaną dla regulatora PID z nastawami minimalizującymi indeks IAE dla odpowiedzi w zamkniętej pętli. Podkreślono, że w ramach pracy wykonano jego implementację oraz przeprowadzono szczegółowe badania dla laboratoryjnego systemu dystrybucji i wymiany ciepła. Zaproponowano również dalsze kierunki rozwoju proponowanego systemu CPA.

### 3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Biorąc pod uwagę zawartość pracy oraz pozytywną ocenę jej treści merytorycznej, za główne osiągnięcia Autora należy uznać opracowanie automatycznego systemu oceny wydajności systemów regulacji PID, jego implementację w przemysłowym sterowniku PLC (Siemens S7-1500) oraz wykonanie szczegółowych badań wraz z prezentacją uzyskanych wyników.

Najważniejszymi elementami rozprawy, decydującymi o jej wartości naukowej i badawczej, są:

1. Opracowanie automatycznego systemu oceny wydajności systemów sterowania z regulatorem PID oceniającego wydajność regulacji na podstawie odpowiedzi układu na skokowe zakłócenie.
2. Wygenerowanie zestawów danych szkoleniowych dla algorytmów uczenia maszynowego dla szerokiego zakresu procesów SOPDT poprzez odpowiednią modyfikację nastaw referencyjnych.
3. Opracowanie metody automatycznego oznaczania odpowiedzi w pętli zamkniętej, opartej na porównaniu wzmocnienia i przesunięcia fazowego dla charakterystyk częstotliwościowych z wcześniej przygotowaną odpowiedzią znormalizowaną.
4. Opracowanie zredukowanej implementacji klasyfikatora, aby proponowany system CPA można było bezpośrednio wdrożyć w sterowniku PLC jako gotowy do użycia blok funkcyjny ogólnego przeznaczenia, łatwy do połączenia z istniejącymi algorytmami PID.

Należy zauważyć, że Autor podjął się realizacji bardzo ciekawego oraz istotnego z punktu widzenia praktycznych zastosowań tematu badawczego. Poszczególne wyniki badań zostały opublikowane w kilku współautorskich pracach w języku angielskim, co świadczy pozytywnie o dużej wiedzy Autora rozprawy w zakresie poruszanej tematyki badawczej.

### 4. Poprawność pracy i uwagi krytyczne

Poprawność treści rozprawy nie wzbudza zastrzeżeń, a stwierdzenia w niej zawarte stanowią podstawę do kontynuowania badań, co wynika w szczególności z przedstawionych podstaw teoretycznych popartych wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Jednocześnie Autor nie ustrzegł się pewnych drobnych niedociągnięć, a wśród uwag o charakterze krytycznym, a po trosze i dyskusyjnym, można wymienić:

1. Nastawy regulatora PID dla przebiegu referencyjnego zostały opracowane dla optymalizacji wybranego wskaźnika w odpowiedzi na skokowe zakłócenie. Ale w przemyśle dla części procesów nastawy regulatora są optymalizowane dla odpowiedzi na skokową zmianę wartości zadanej (np. dla uzyskania odpowiedzi aperiodycznej krytycznej czy oscylacyjnej o zadanym przeregulowaniu). Jaka wtedy będzie ocena wydajności proponowanego systemu CPA? Czy układu regulacji z prawidłowo nastrojonym regulatorem system nie oceni jako NOK?
2. Dlaczego do obliczenia nastaw dla przebiegu referencyjnego został wybrany wskaźnik IAE? Czy testowano również inne wskaźniki, a jeśli nie, to dlaczego?
3. W proponowanym systemie CPA ocena NOK oznacza, że nastawy regulatora PID nie są prawidłowe i układ regulacji nie jest wydajny. A czy oceny NOK nie otrzymamy również dla procesów przemysłowych, w których regulatory są prawidłowo nastrojone, ale (ze względu na rodzaj obiektu) jego odpowiedź skokowa znacznie odbiega od przyjętej w systemie odpowiedzi referencyjnej? Jak te dwie sytuacje rozróżnić, aby klasyfikator nie odrzucał układów dobrze nastrojonych (według założeń technologicznych)?
4. Czy, zdaniem Autora, możliwe jest rozszerzenie proponowanego systemu o inne przebiegi referencyjne (np. oscylacyjne) i potem wybór (ręczny przez operatora lub automatyczny przez

system) odpowiedniego dla danego procesu technologicznego? Czy jakieś wstępne badania w tym kierunku były prowadzone?

5. Drobne uwagi szczegółowe (najważniejsze):

- Str. 22 – opisy do tabel zwykle umieszczamy przed tabelą (na górze), a nie za nią.
- Str. 22 – brak odstępu (interlinii) pomiędzy tabelą a jej opisem (dotyczy wszystkich tabel).
- Str. 32 – tabela wystaje poza marginesy tekstu (dotyczy wszystkich dużych tabel).
- Str. 55 – trochę zbyt mała czcionka w opisach na rys.2.45 (dotyczy również kolejnych).
- Str. 85 – trochę zbyt mała czcionka w tabeli 3.5 (dotyczy również kolejnych).

## 5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi dyskusyjne nie umniejszają zasług Autora ani nie kwestionują przedstawionych osiągnięć, a opisywana w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych. Recenzowana praca zasługuje na wysoką ocenę merytoryczną i wnosi istotny oraz oryginalny wkład w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Postawione cele i zadania pracy zostały zrealizowane, a jej tematyka wpisuje się we współczesny nurt badań w tym zakresie.

Stwierdzam zatem z pełnym przekonaniem, że opiniowana rozprawa mgr inż. Patryka Grelewicza pt. *„Application of fusion of chosen control performance assessment methods for automatic diagnostics and performance improvement of control systems”* zawiera samodzielne rozwiązanie ważnego i istotnego problemu naukowego. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, tak więc wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Zbigniew Świder